第37卷 第6期
2020年11月

干 旱 区 研 究
ARID ZONE RESEARCH

Vol. 37 No. 6
Nov. 2020

基于改进彭曼公式法的疏勒河流域植被耗水时空分布研究

魏乐民[1]， 郑 续[1]， 郭建军[2]， 周妍妍[1]， 岳东霞[1]

（1. 兰州大学资源环境学院，甘肃 兰州 730000；
2. 中国科学院西北生态环境资源研究院 沙漠与沙漠化重点实验室，甘肃 兰州 730000）

摘 要： 疏勒河流域位于内陆干旱区，水资源是制约流域植被生长和发展的关键因素，植被耗水量研究对于实现该流域水资源合理配置起着至关重要的作用。本文基于气象数据和GIS技术，使用改进的彭曼公式法，定量分析了疏勒河流域不同植被类型各生长阶段耗水量的时空变化特征。研究结果表明：疏勒河流域植被耗水量在2000—2015年间呈上升趋势，多年平均耗水量为18.24×10⁸ m³。植被耗水量呈明显的空间异质性，南部祁连山区植被耗水最多，北部马鬃山地区最少。荒漠植被耗水量最多（11.25×10⁸ m³），有林地最少（0.10×10⁸ m³）。2000—2015年植被不同生长阶段的耗水量变化存在较大差异，生长初期和发育期的耗水量呈减少趋势，生长中期和生长晚期的耗水量呈增加趋势。相比植被分布变化，参考蒸散发量的变化是疏勒河流域植被耗水变化的主要影响因素。

关键词： 疏勒河流域；植被耗水量；蒸散发量；改进的彭曼公式法

随着社会经济的发展和人口的增长[1-3]，对水资源的不合理开发使原本缺水的干旱区内陆河流域面临更加严重的缺水危机，流域植被退化、土地沙化等问题日渐严重，生态环境逐渐恶化[4]。植被是流域生态系统中不可或缺的组成部分，具有涵养水分、保持水土等生态功能，对维护流域生态环境具有重要的作用[5]。植被群落的正常生长和发育需要消耗一定的水量，不同植被类型及生长阶段的耗水量相差甚远[6]，因此，全面了解流域植被耗水时空分布规律及其变化特征对优化流域植被结构，实现水资源合理利用具有十分重要的意义。

蒸散发是植被耗水的主要方式[6]，近年来，有大量研究利用蒸散发来估算植被耗水量。Lu等[7]在植被修复背景下基于5个经验模型和3个过程模型对我国干旱半干旱地区进行了植被蒸散耗水研究，发现植被耗水量已超过区域降水量，并加剧了地下水位的下降。Gao等[8]基于地表能量平衡系统(Surface Energy Balance System，SEBS)模型计算了2014—2015年黑河下游天然绿洲的植被耗水量，并综合多种方法得到了天然绿洲的生态耗水量，发现河流水资源已无法满足天然绿洲、农业生产和社会经济发展的需求。亢丹等[9]基于陆面地表平衡算法（Surface Energy Balance Algorithm for Land，SEBAL）分析了赤峰市植被修复工程开展后的植被耗水量时空变化特征与水分盈亏状况，发现林地耗水量增幅明显，面临严重的水分亏缺。Chi等[10]基于改进的彭曼公式估算了我国东北额尔古纳河流域2001—2014年的植被蒸散耗水量，并与降水量进行对比，发现研究区植被面临较为严重的水分胁迫，其中生长初期和发育期水分亏缺尤为严重。目前，植被耗水量计算方法主要有面积定额法[11-14]、潜水蒸散发法[15-21]、遥感模型法[7-9,22-23]、生物量法[24]和改进的彭曼公式法[10,25-27]等。改进的彭曼公式法是以植被潜在蒸散发为基础，结合土壤水分和植被面积等因素计算植被蒸散耗水。该方法目前已较为成熟，数据易获取，有较好的操作性[28]，适用于荒漠、草原、森林等多种生态系统[10]。

地处干旱区的疏勒河流域水资源稀缺，生态环

收稿日期： 2020-03-19； **修订日期：** 2020-05-26
项目资助： 国家自然科学基金项目（41701623，41671516）；国家重点研发计划项目（2017YFC1501005）；中央高校基本科研业务费项目（lzujb ky-2020-sp03）
作者简介： 魏乐民（1997-），男，硕士研究生，主要从事生态安全评价研究. E-mail: leminwei@126.com
通讯作者： 郭建军. E-mail: jjguo@lzb.ac.cn

境脆弱,其又位于“两屏三带”中的北方防沙带,是重要的生态屏障[29],并且流域内有著名的敦煌莫高窟、月牙泉、阳关和玉门关遗址等风景名胜,是我国“一带一路”发展战略实施的重要节点区域[30],因此,流域内的植被保护具有重大的生态意义和政治意义,明确流域内植被耗水时空分布规律,是合理分配水资源以确保植被正常生长的先决条件。在疏勒河流域已有多个关于植被耗水量的研究成果[18-21],但均以有限的站点数据和单一植被系数为基础数据,估算结果空间分辨率不高,且未进行年内植被耗水量分析,尚不足以作为水资源科学配置的参考依据。针对以上不足,本文采用改进的彭曼公式法,在气象数据的支持下,结合GIS技术对疏勒河流域2000年、2005年、2010年和2015年的植被耗水量进行栅格尺度的计算,并分析其时空分布及变化情况,探讨植被类型和参考蒸散发量变化对耗水量的影响,以期进一步明确流域植被水资源消耗情况,为流域水资源合理分配提供更准确、科学的参考依据。

1 研究区概况

疏勒河流域(93°22′~98°59′E,38°01′~42°47′N)地处我国西北干旱区腹地,流域面积约为1.25×10^5 km^2,是我国河西走廊地区三大主要内陆河流域之一(图1)。该流域干流为疏勒河,长约670 km,支流主要有党河、白杨河、石油河、榆林河及阿尔金山北麓的长草沟、鄂博沟、洪水沟等。行政区划包括酒泉市下辖的敦煌市、玉门市、肃北县、瓜州县、阿克塞县及青海省天峻县和德令哈市的部分地区。流域降水稀少且分布极不均匀,呈现由东南向西北递减的趋势,是甘肃省干旱程度最严重的地区之一[31]。该流域水源补给方式主要为高山冰雪融水与山区降水[32],水资源利用量大,利用率低,加之地下水开采过度[30],导致水资源极为短缺。因此,疏勒河流域植被耗水量的研究具有重要意义。综合考虑疏勒河流域气候条件、地形地貌特征及行政区划,将疏勒河流域划分为南部祁连山区、中部平原区和北部马鬃山区,并将托勒站、玉门站和马鬃山站作为相应分区的代表气象站点。南部祁连山地区是整个流域的水源涵养区和产流区,中部平原地区和北部马鬃山地区气候干旱,风沙大,绿洲与荒漠并存,生态环境极为脆弱。

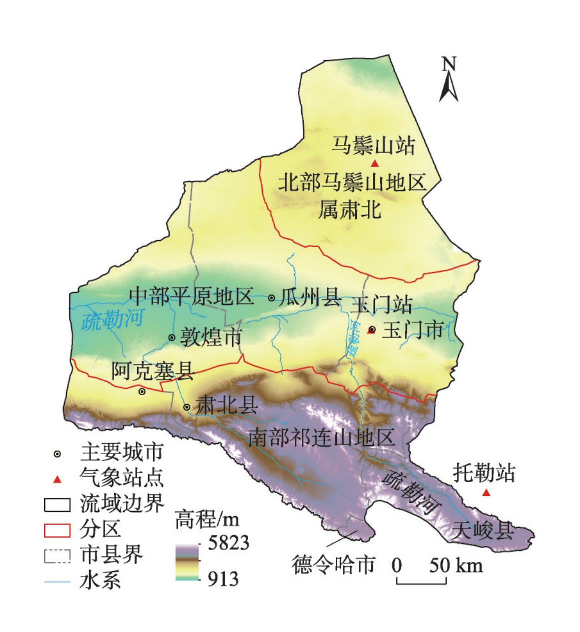


图1 研究区示意图

Fig. 1 Overview of the study area

2 研究方法及数据处理

2.1 研究方法

2.1.1 植被耗水量计算模型 疏勒河流域植被覆盖度低且退化严重,无法完全覆盖地表,并且植被的生长受到土壤水分的影响,其影响程度是由土壤水分限制系数确定。因此,非完全覆盖植被的蒸散发量计算需要在联合国粮农组织(Food and Agricultural Organization, FAO)推荐的植被蒸散发计算方法[33]的基础上考虑土壤水分限制系数,计算公式如下:

$$ET_p = K_c K_s ET_0 \quad (1)$$

式中:ET_p 为植被蒸散发速率(mm·d^{-1});K_c 为植被系数;K_s 为土壤水分限制系数;ET_0 为参考蒸散发速率(mm·d^{-1})。

植被耗水量考虑不同类型植被的覆盖面积,计算公式如下:

$$VWC = \sum_{n=1}^{n} ET_{p,n} \times A_p \times 10^{-3} \quad (2)$$

式中:VWC 为植被耗水量(m^3);A_p 为各植被类型分布面积(m^2);$ET_{p,n}$ 为第 n 天的植被蒸散发速率(mm·d^{-1});n 为植被生长期天数。

2.1.2 参考蒸散发速率(ET_0)的计算 参考蒸散发速率 ET_0 可以根据Penman-Monteith公式[33]计算得到。方程如下:

$$ET_0 = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma\frac{900}{T+273}u_2(e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34u_2)} \quad (3)$$

式中：Δ为温度变化曲线与饱和的水汽压之间斜率（KPa·℃$^{-1}$）；R_n 为作物表面净辐射量（MJ·m^{-2}·d^{-1}）；G 为土壤热通量（MJ·m^{-2}·d^{-1}）；γ 为干湿表常数（KPa·℃$^{-1}$）；T 为2 m高处平均气温（℃）；u_2 为2 m高处平均风速（m·s^{-1}）；e_s 为饱和水汽压（KPa）；e_a 为实际水汽压（KPa）。

2.1.3 植被系数的确定 植被系数（K_c）是指植被最大耗水量与最大可能蒸发量之间的比值[26]。除环境条件外，K_c 还与植被类型、生长阶段等因素有关。一年中，植被的生长过程可分为生长初期、发育期、生长中期和生长晚期，各生长阶段的 K_c 基于各分区的代表气象站点数据进行分别计算。

本文根据土地利用数据将疏勒河植被类型划分为有林地、灌木林地、疏林地、高覆盖度草地、中覆盖度草地和荒漠植被等六个类型。根据酒泉市林业局的树种结构统计资料和刘惠峰[34]基于时序NDVI的疏勒河流域植被覆盖分类结果确定各植被类型的优势物种（表1）。植被系数和生长阶段参考各植被类型的优势物种划分，并根据刘娇[26]和冯湘华[35]对黑河流域对应植被生长季各生长阶段的划定以及中国科学院发表的《中国动植物物候观测年报》第8号（1982年）[36]中相关区域的植被物候信息，划定了疏勒河流域植被生长季各生长阶段（表1）。

植被生长初期的植被系数（$K_{c.ini}$）主要由土壤湿润时间间隔、湿润程度和大气蒸发能力决定[10]。生长中期植被系数（$K_{c.mid}$）和生长末期植被系数（$K_{c.end}$）由有效地表覆盖确定，发育期的植被系数是 $K_{c.ini}$ 和 $K_{c.mid}$ 的线性内插值，生长晚期植被系数为 $K_{c.mid}$ 和 $K_{c.end}$ 的线性内插值[10,26]。本文 K_c 值基于2010年的气象数据和NDVI数据进行计算。

2.1.4 土壤水分限制系数的确定 土壤水分限制系数（K_s）可由土壤含水率、土壤临界含水率和土壤凋萎系数确定。刘娇[26]基于MODIS遥感数据，运用表观热惯量法对托勒站、玉门站和马鬃山站所在地区的土壤含水量进行了反演，并得到了 K_s 值，本文引用该成果代表三个分区的 K_s。

2.1.5 植被耗水量年际变化分析方法 利用最小二乘法，计算栅格尺度的植被耗水量年际变化速率，计算公式为：

$$K = \frac{\sum_{i=1}^{n} i \times VWC_i - \left(\sum_{i=1}^{n} i\right)\left(\sum_{i=1}^{n} VWC_i\right)/n}{\sum_{i=1}^{n} i^2 - \left(\sum_{i=1}^{n} i\right)^2/n} \quad (4)$$

式中：K 为每个栅格植被耗水量的变化速率[m^3·(5a)$^{-1}$]；n 为研究时段；VWC_i 为第 i 年的植被耗水量。K 值为正表示植被耗水量呈现增加趋势，值越大，其增加的趋势越明显，K 值为负表示植被耗水量呈现减少趋势，值越小，其减少趋势越明显。

2.2 数据源及预处理

本文使用的数字高程模型（DEM）来自于中国地理空间数据云的数字高程数据产品（http://www.gscloud.cn），其空间分辨率是30 m。气象资料由国家气象数据中心提供（http://data.cma.cn），包括逐日最高和最低气温、平均气温、平均风速、日照时数、水汽压、平均相对湿度、最低相对湿度和降水量。地表气压、近地面风速等数据来自中国科学院寒区旱区科学数据中心（http://westdc.westgis.ac.cn）的中国区域高时空分辨率地面气象要素驱动数据集，其空间分辨率为10 km，时间分辨率为日。土地利用

表1 植被生长阶段划分

Tab. 1 Division of growth stages of the vegetation

植被类型	优势物种	生长阶段（月-日）			
		生长初期	发育期	生长中期	生长晚期
有林地	胡杨（*Populus euphratica*）	04-15—05-04	05-05—05-14	05-15—09-16	09-17—10-31
灌木林地	多枝柽柳（*Tamarix ramosissima*）	04-11—04-26	04-27—06-10	06-11—10-02	10-03—11-01
疏林地	胡杨	04-15—05-04	05-05—05-14	05-15—09-16	09-17—10-31
高覆盖度草地	蒿草（*Artemisia*）	04-25—06-15	06-16—07-15	07-16—08-28	08-29—09-19
中覆盖度草地	芨芨草（*Achnatherum splendens*）	04-23—06-15	06-16—07-17	07-18—08-31	09-01—09-23
荒漠植被	骆驼刺（*Alhagi sparsifolia*） 白刺（*Nitraria tangutorum*）	04-04—06-04	06-05—07-09	07-10—08-31	09-01—09-27

数据来源于中国科学院资源环境科学数据中心(http://www.resdc.cn)，其空间分辨率为30 m。NDVI数据选用空间分辨率为1 km的16天合成植被指数产品MOD13A2(https://ladsweb.modaps.eosdis.nasa.gov/)。

本文使用气象数据求得各站点的净辐射值，并运用ArcGIS 10.5对其进行反距离加权插值(IDW)，得到净辐射空间栅格数据。将最高和最低气温、平均气温和相对湿度的站点数据使用Anusplin插值方法进行空间插值处理。将所有的空间数据均统一为相同的投影坐标和1 km空间分辨率。

3 结果与分析

3.1 植被耗水量时空变化分析

2000—2015年疏勒河流域植被耗水量呈现上升趋势(表2)，增加0.94×10^8 m^3，多年平均值为18.24×10^8 m^3。南部祁连山区植被耗水量最多(9.48×10^8 m^3)，中部平原区次之(4.64×10^8 m^3)，北部马鬃山区最少(4.12×10^8 m^3)，且均呈现上升趋势，分别增长0.30×10^8 m^3、0.28×10^8 m^3和0.35×10^8 m^3。县域尺度上(表2)，肃北县植被耗水最多(9.58×10^8 m^3)，德令哈市辖区最少(0.16×10^8 m^3)，16 a间，除南部山区的阿塞克县和肃北县分别减少0.02×10^8 m^3和0.07×10^8 m^3，其他县域均有所增加，其中天峻县增加最多(0.38×10^8 m^3)。

年均植被耗水量空间分布如图2a所示，呈现较为明显的空间异质性，高值区主要集中于阿克塞县的山区和玉门市的绿洲区，低值区主要分布于祁连山区和中部平原区的荒漠植被区。

植被耗水量变化速率范围为−54056~57440 m^3·$(5a)^{-1}$，根据范围将其划分为显著增加、轻微增加、基本不变、轻微减少、显著减少五种变化程度，各程度变化速率的数值范围如表3所示，其空间分布如图2b所示。植被耗水量增加的区域占植被总面积的44.87%，其中，显著增加的区域占比为0.92%，主要分布于中部平原区花海灌区附近和天峻县的冰川消融产流区域，轻微增加的区域占比为43.96%，主要分布于天峻县境内、中部平原绿洲区和马鬃山地区。植被耗水量减少的区域占比为37.42%，其中，显著减少的区域占比为0.09%，零星分布于绿洲区周边，肃北和天峻县境内，其原因可能是绿洲边缘强烈的人类活动对植被造成了破坏。轻微减小的区域占比为47.33%，主要分布于祁连山地区，这可能与该地区的蒸散发量呈减少趋势[37-38]相关。

3.2 不同植被类型的耗水量差异分析

各植被类型年均耗水量显示(表4)，荒漠植被(11.26×10^8 m^3)>中覆盖度草地(3.96×10^8 m^3)>高覆盖度草地(1.64×10^8 m^3)>灌木林地(1.07×10^8 m^3)>疏林地(0.22×10^8 m^3)>有林地(0.10×10^8 m^3)。由于林地分布面积远小于草地和荒漠植物，林地的耗水量占比仅为7.60%，草地耗水量占比为30.70%，荒漠植物的耗水量占比高达61.70%。2000—2015年，所有植被耗水量均有增加，林地耗水量增加了0.09×10^8 m^3，占耗水量增加总量的10%，草地和荒漠植物的耗水量增加了0.84×10^8 m^3(90%)，说明草地和荒漠植被的耗水量增加是导致耗水总量增涨的主要原因。

图3中的数据来源于每个栅格植被耗水量的平

表2　疏勒河流域各分区及县域植被耗水量

Tab. 2　The vegetation water consumption of Shule River Basin in different regions and county regions　/10^8 m^3

区域	县域	2000年	2005年	2010年	2015年	平均值
南部祁连山区	阿克塞	1.08	1.03	1.03	1.06	1.05
	肃北	5.50	5.47	5.43	5.43	5.46
	德令哈	0.15	0.16	0.16	0.17	0.16
	天骏	2.66	2.74	2.81	3.04	2.81
	总计	9.39	9.40	9.41	9.69	9.48
中部平原区	敦煌	1.17	1.23	1.25	1.27	1.23
	玉门	1.65	1.67	1.62	1.80	1.69
	瓜州	1.73	1.69	1.74	1.76	1.73
	总计	4.55	4.59	4.60	4.83	4.64
北部马鬃山区	肃北	3.94	4.08	4.17	4.29	4.12
流域总量		17.88	18.07	18.19	18.82	18.24

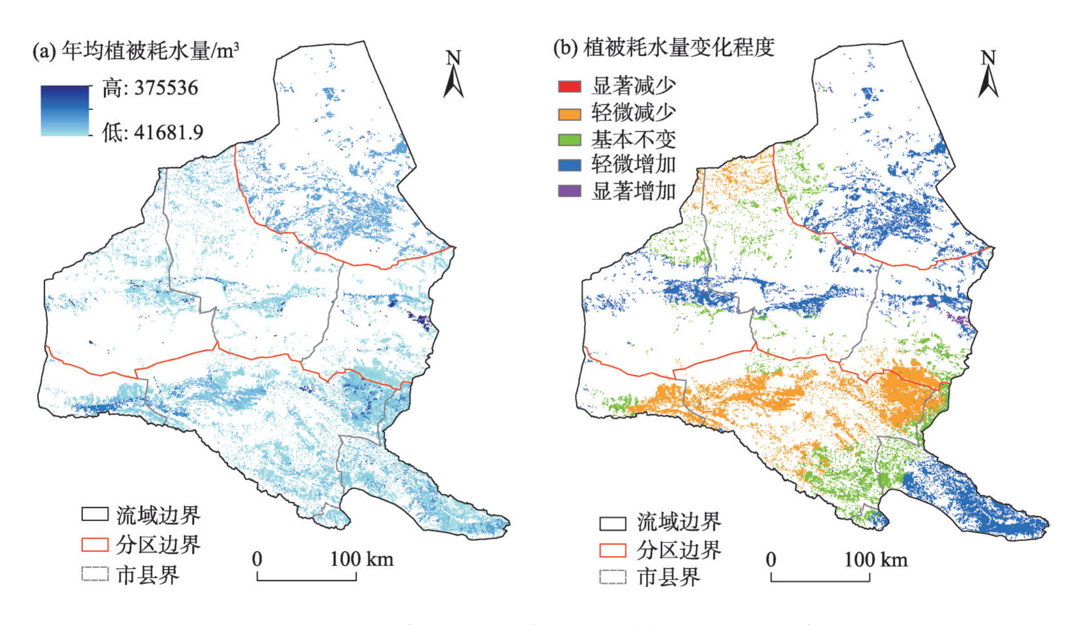


图2 疏勒河流域年均植被耗水量空间分布(a)及变化程度(b)

Fig. 2 Spatial distribution of the annual average vegetation water consumption (a) and change degree of the vegetation water consumption (b) in Shule River Basin

表3 植被耗水量变化程度划分

Tab. 3 Division of variation degree of the vegetation water consumption /[m³·(5a)⁻¹]

变化程度	变化速率范围
显著减少	−54056 ~ −10000
轻微减少	−10000 ~ −1000
基本不变	−1000 ~ 1000
轻微增加	1000 ~ 10000
显著增加	10000 ~ 57440

表4 疏勒河流域不同年份各植被类型的耗水量

Tab. 4 The water consumption of each vegetation type in different years in Shule River Basin /10⁸ m³

植被类型	2000年	2005年	2010年	2015年	平均值
有林地	0.10	0.10	0.10	0.11	0.10
疏林地	0.22	0.21	0.22	0.23	0.22
灌木林地	1.04	1.07	1.04	1.12	1.07
高覆盖度草地	1.60	1.59	1.62	1.73	1.64
中覆盖度草地	3.89	3.94	3.95	4.06	3.96
荒漠植被	11.03	11.16	11.26	11.57	11.26

均值,反映了各栅格耗水量的空间分布规律,也可以获取各单位面积的植被耗水量。整体而言,单位面积植被耗水量呈现有林地 > 灌木林地 > 疏林地 > 高覆盖度草地 > 中覆盖度草地 > 荒漠植被的趋势(T检验$P<0.01$)。高覆盖度草地和灌木林地的箱体较长,说明二者耗水量具有更高的异质性;荒漠植被和中覆盖度草地箱体较短,数值分布较为集中,异质性较低。

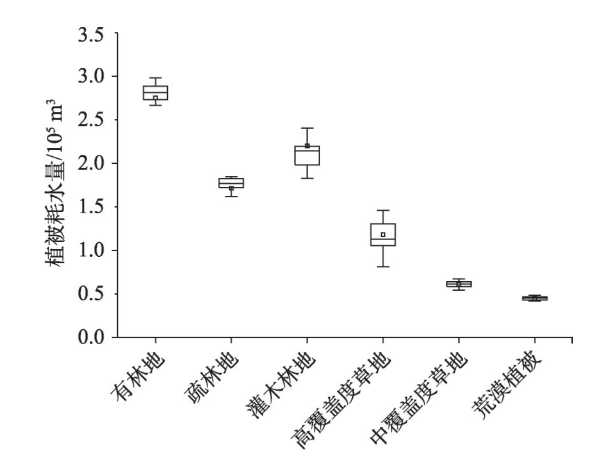


图3 各植被类型栅格平均耗水量箱线图

Fig. 3 Box diagram of the grid average water consumption of each vegetation type

3.3 不同植被年内各生长阶段的耗水量分析

植被年内不同生长阶段的耗水量有较大的差异(图4)。有林地和疏林地耗水主要集中在生长中期和生长晚期,占比超过90%。灌木林地、高覆盖度草地、中覆盖度草地、荒漠植被均呈现生长中期>发育期>生长晚期>生长初期的规律。

2000—2015年植被各生长阶段的耗水变化量显示(图4),所有植被的生长初期和发育期的耗水量均有小幅减少,有林地、疏林地和荒漠植被在生

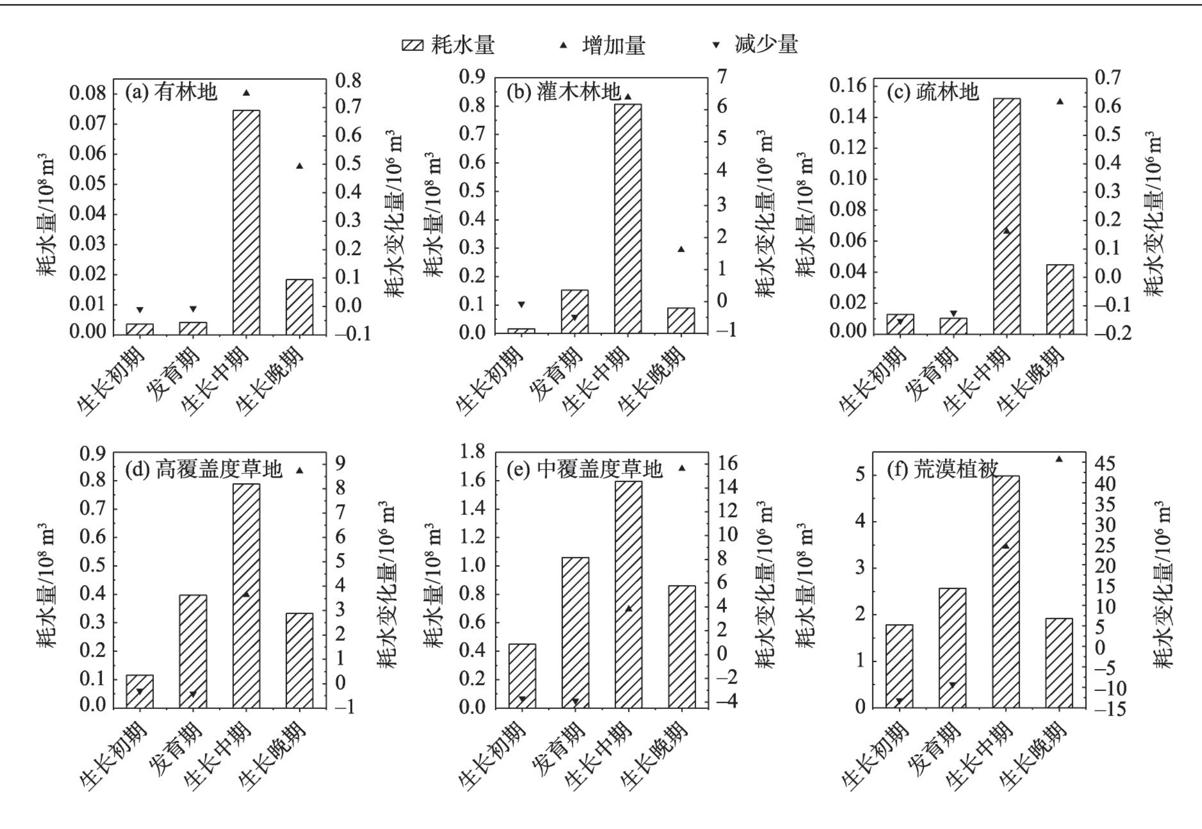


图4　各植被类型4个生长阶段的耗水量及变化量

Fig. 4　The water consumption and variation of each vegetation type at four growth stages

长初期减少最多，灌木林地和高、中覆盖度草地发育期减少最多。所有植被生长中期和生长晚期的耗水量都有较大程度的增加，生长初期和生长晚期的耗水量有小幅减少。有林地和灌木林地生长中期增加最多，疏林地、高、中覆盖度草地和荒漠植被生长晚期增加最多。

3.4　植被分布和参考蒸散发量的变化对耗水量的影响

由耗水量估算方法可知，植被分布面积和参考蒸散发量是仅有的随时间变化的两个变量，二者共同作用导致了植被耗水量的增加，为明晰二者的影响程度，本文在2000—2015年转移矩阵的基础上，采用控制变量法，假定参考蒸散发量一直保持在2000年的水平，变量仅为植被分布面积，进而统计出了植被变化对耗水量增加的贡献度（表5）。2000—2015年，有林地面积增加了3.52 km^2，疏林地和灌木林地分别减少了6.51 km^2和4.50 km^2，高、中覆盖度草地和荒漠植被分别增加了10.57 km^2、3.29 km^2和19.29 km^2。植被分布变化导致耗水量增加了4.23×10^6 m^3，占总增长量的4.53%。在导致耗水量增加的植被类型转移中，其他土地类型转入荒漠植被的面积高达545.85 km^2，使耗水量增加最多，增量为32.00×10^6 m^3，占总增长量的34.28%。另外，其他土地类型转入中覆盖度草地和灌木林地也使耗水量增加较多，分别为5.67×10^6 m^3（6.07%）和2.34×10^6 m^3（2.51%）。相较而言，荒漠植被、中覆盖度草地转入有林地和疏林地对耗水量的增加影响不大。导致耗水量减少的植被类型转移中，荒漠植被转入其他土地类型的面积为485.22 km^2，使耗水量减少最多（27.26×10^6 m^3），贡献度为−29.20%。中覆盖度草地和灌木林地转入其他土地类型使耗水量减少较多，分别为5.66×10^6 m^3（−6.06%）和4.07×10^6 m^3（−4.36%）。相比之下，疏林地转入中、高覆盖度草地以及灌木林地转入中覆盖度草地使耗水量减少不多。

除去植被分布变化对植被耗水量的影响后，剩余95.47%的变化量则由参考蒸散发量的变化引起。2000—2015年植被区参考蒸散发变化量的范围在−149.11~302.19 mm（图5），增加的区域占植被面积的56.37%，主要分布在中部平原绿洲区、天峻县和马鬃山地区，减少的区域占比为43.62%，主要分布在祁连山地区和瓜州西北部。所有植被类型的参考蒸散发量均有增加，其中疏林地增加最多（104.18 mm），有林地、灌木林地、高、中覆盖度草地

表5 2000—2015年植被分布变化对耗水量变化的影响

Tab. 5 Impact of transformation of vegetation distribution on change of water consumption from2000 to 2015

2000年		2015年						
		有林地	疏林地	灌木林地	高覆盖度草地	中覆盖度草地	荒漠植被	其他土地类型
有林地	面积							1.57
	贡献量							−0.54
	贡献度							−0.58
疏林地	面积				0.17	1.11	1.60	10.28
	贡献量				−0.05	−0.10	−0.46	−2.05
	贡献度				−0.05	−0.11	−0.49	−2.20
灌木林地	面积					1.63	6.85	18.54
	贡献量					−0.09	−1.21	−4.07
	贡献度					−0.10	−1.30	−4.36
高覆盖度草地	面积		1.10			10.08	8.53	18.22
	贡献量		0.29			−0.27	−0.14	−2.34
	贡献度		0.31			−0.29	−0.15	−2.51
中覆盖度草地	面积	0.80	2.12	2.37	14.35		55.52	106.75
	贡献量	0.26	0.28	0.38	0.82		−1.13	−5.66
	贡献度	0.28	0.30	0.41	0.88		−1.21	−6.06
荒漠植被	面积	0.26	1.88	7.19	15.46	89.06		485.22
	贡献量	0.22	0.23	1.60	0.77	1.83		−27.26
	贡献度	0.24	0.25	1.71	0.83	1.96		−29.20
其他土地类型	面积	4.03	1.55	12.96	18.55	83.31	545.85	
	贡献量	0.62	0.48	2.34	1.81	5.67	32.00	
	贡献度	0.66	0.51	2.51	1.94	6.07	34.28	
总计	贡献量	4.23		贡献度	4.53			

注:空值代表植被类型保持不变或相互之间未发生转变。面积的单位为km²;贡献量的单位为10^6 m³;贡献度的单位为%。

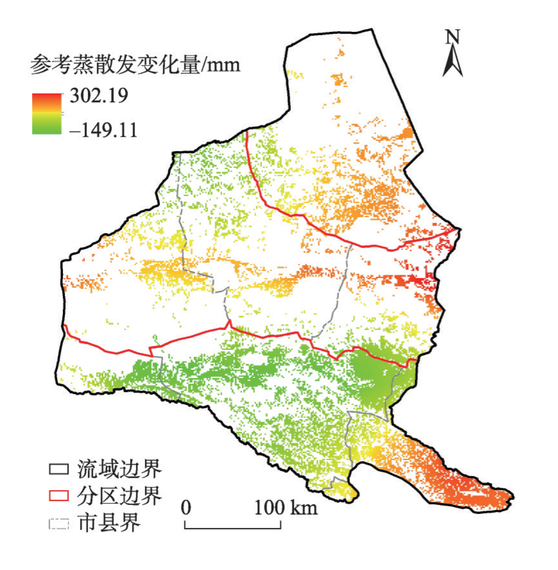


图5 植被区参考蒸散发变化量

Fig. 5 The variation of ET_0 in vegetation regions

和荒漠植被分别增加76.43 mm、64.66 mm、79.97 mm、24.76 mm和57.65 mm。

4 讨 论

在人口增加但水资源日益短缺的干旱区内陆河流域,生态需水和生产需水的水资源分配是人们关注的焦点问题,作为生态需水主要组成部分的植被耗水量是维护天然绿洲和人工绿洲防护体系稳定生长的关键[24]。本文在气象数据和GIS技术的支持下,采用改进的彭曼公式法对疏勒河流域的植被耗水量进行了栅格尺度的计算,对其时空分布及变化规律进行了探讨,并分析了植被分布和参考蒸散发量的变化对耗水量的影响,以期为疏勒河流域更合理的水资源时空分配提供参考依据。

本文以植被耗水定额为对比项,引用疏勒河流域及同处干旱区的黑河流域及阿克苏河流域的相关结果对本文进行验证(表6)。同一流域,本文植被耗水计算结果略大于曾建军[21]的估算值,这可能

表6 基于植被耗水定额的对比验证

Tab. 6 Comparison and verification based on the vegetation water consumption quota

研究内容		研究者			
		曾建军[21]	刘娇[26]	张瑞文等[39]	本文
研究概况	研究区	疏勒河流域	黑河流域	阿克苏流域胡杨林	疏勒河流域
	研究时段	1995—2015年	1959—2008年	2018年	2000—2015年
	研究方法	潜水蒸散发法	改进的彭曼公式法	HYDRUS模型	改进的彭曼公式法
植被耗水定额/mm	有林地	197.1	259.6	179.5~242.6	272.5
	疏林地	146.7	193.8	–	181.0
	灌木林地	158.7	211.5	–	227.3
	高覆盖度草地	121.8	208.9	–	116.0
	中覆盖度草地	8.8	99.3	–	65.3
	荒漠植被/低覆盖度草地	38.8	106.3	–	58.3

与植被蒸散发估算值差异有关,而在环境背景相似且毗邻的黑河流域,刘娇[26]所得林地的植被耗水定额与本文接近,并且不同植被类型耗水量定额大小排序与本文基本相似。同样的,本文将胡杨作为有林地的优势物种,有林地的耗水定额与张瑞文等[39]在阿克苏流域开展的胡杨耗水研究结果较为相似。因而,本文栅格尺度的植被耗水计算结果具有较高的可信度。然而,尽管本文在1000 m空间栅格尺度上实现了疏勒河流域植被耗水的空间表达,空间精度较已有的县域尺度有所提高[19-21],但考虑到景观生态学研究中的尺度效应[40],更精确的植被耗水研究需要在更多尺度开展,更高空间分辨率的植被耗水研究能够弥补大尺度研究中局部信息的丢失,使得对植被耗水有更清晰的了解。

疏勒河流域植被耗水量呈增长趋势(表2),增加区域主要位于天峻县境内、中部平原绿洲区和马鬃山地区。天峻县境内耗水量的增长主要是由于全球变暖,冰川的消融量增大,使该区域的水分充足,自然植被生长良好[30],耗水量随之增加。中部平原绿洲区和马鬃山地区耗水量增加的主要原因是近年来植树造林种草等积极的生态保护和恢复措施使植被得到了较好的恢复和发展[29]。植被耗水量的增加使得疏勒河流域生态用水面临更严峻的形式。然而,该流域植被耗水量在空间分布上具有明显的异质性(图2a),不同植被年内不同生长阶段的耗水也有较大差异(图4),这些提醒我们在水资源调配中应该根据区域植被类型以及植被耗水量空间分布特点制定合理的植被保护和恢复目标,尤其在耗水量最大的生长中期,需要对天然绿洲和人工绿洲防护体系等非地带性植被区域的降水情况和植被状况进行监测,及时发现因缺水导致的植被退化问题,灵活调整水资源分配。另一方面,过度的植被建设会占用大量水资源,应该充分了解区域地下水和降水状况,以不同植被类型的单位面积耗水量为依据,结合水资源调控的最大量,明确区域植被承载力,合理地控制植树造林种草的上限[41],重点关注生态保护地区的植被建设,协调用于经济发展和生态环境保护的水资源供需关系,制定兼顾经济发展的生态环境恢复和水资源管控政策。同时,可以从“开源”和“节流”两个方面增加水资源量,“开源”主要是通过跨流域调水的方式来增加流域的水资源总量,扩大水资源空间,“节流”主要通过控制耕地总量,调整农业种植结构,大力发展节水农业等方法来调配更多的水资源用于生态保护和恢复。

植被分布和参考蒸散发变化是植被耗水量估算的重要参数,明确其对植被耗水量变化的影响对干旱区内陆河流域植被健康发展具有重要意义。疏勒河流域植被分布和参考蒸散发对植被耗水变化的作用强度差异明显,尽管植被分布转换程度较大(表5),但各植被参考蒸散发的增加(图5)是导致植被耗水增加的最主要驱动因素。植被分布变化主要由人为活动引起[29],考虑到日益严格的土地利用\覆被管控政策[42],植被分布变化对植被耗水量的影响将会进一步减小,参考蒸散发变化的影响将被放大,气候变化是导致参考蒸散发量变化的重要因素[37,43],在气候持续变化背景下[44],疏勒河流域的植被耗水量可能会进一步增多,这将加重流域水资源短缺危机,因此,科学合理的流域水资源配置刻不容缓。

本文虽然针对疏勒河流域植被耗水量进行了一定的探索,完善了流域植被水资源利用信息,但

研究也存在需要进一步完善的方面：其一，以一个典型站点的 K_c 和 K_s 代表整个分区，而未考虑分区内的植被和土壤差异，若辅以更多的气象站点和遥感数据得到更小尺度分区的 K_c 和 K_s，结果将会更加精确；其二，气候变化对植被耗水量的影响未在本文中进行深入探讨，若能完善，这一研究会更加完整。

5 结 论

（1）疏勒河流域年平均植被耗水量为 18.24×10^8 m³，南部祁连山地区最多（9.48×10^8 m³），中部平原区次之（4.64×10^8 m³），北部马鬃山地区最少（4.12×10^8 m³）。

（2）疏勒河流域植被耗水量呈上升趋势，其增加的区域主要分布在天峻县境内、中部平原绿洲区和马鬃山地区，减少的区域主要分布在祁连山地区。

（3）不同植被类型耗水量差异明显，荒漠植被>中覆盖度草地>高覆盖度草地>灌木林地>疏林地>有林地。

（4）有林地和疏林地年内耗水量主要集中在生长中期和生长晚期，其他植被均呈现生长中期>发育期>生长晚期>生长初期的规律。所有植被生长中期和生长晚期的耗水量都有较大程度的增加，生长初期和生长晚期的耗水量有小幅减少。

（5）植被分布变化使耗水量增加了 4.23×10^6 m³，占总增量的4.53%，剩余增量由参考蒸散发量的变化引起。

参考文献（References）：

[1] Cai Y P, Huang G H, Yang Z F, et al. Identification of optimal strategies for energy management systems planning under multiple uncertainties[J]. Applied Energy, 2009, 86(4): 480–495.

[2] Hu Q, Huang G, Cai Y, Sun W. Planning of electric power generation systems under multiple uncertainties and constraint-violation levels [J]. Journal of Environmental Informatics, 2014, 23(1): 55–64.

[3] Tan Q, Huang G H, Cai Y P. Radial interval chance-constrained programming for agricultural non-point source water pollution control under uncertainty[J]. Agricultural Water Management, 2011, 98(10): 1595–1606.

[4] 胡广录, 赵文智. 干旱半干旱区植被生态需水量计算方法评述[J]. 生态学报, 2008, 28(12): 501–510. [Hu Guanglu, Zhao Wenzhi. Reviews on calculating methods of vegetation ecological water requirement in arid and semiarid regions[J]. Acta Ecologica Sinica, 2008, 28(12): 501–510.]

[5] 王宏昌. 中国西部气候——生态演替: 历史与展望[M]. 北京: 经济管理出版社, 2001. [Wang Hongchang. Climate in Western China, Ecological Succession: History and Prospects[M]. Beijing: Economic Management Press, 2001.]

[6] 郑红星, 刘昌明, 丰华丽. 生态需水的理论内涵探讨[J]. 水科学进展, 2004, 15(5): 626–633. [Zheng Hongxing, Liu Changming, Feng Huali. On concepts of ecological water demand[J]. Advances in Water Science, 2004, 15(5): 626–633.]

[7] Lu C, Zhao T, Shi X, et al. Ecological restoration by afforestation may increase groundwater depth and create potentially large ecological and water opportunity costs in arid and semiarid China[J]. Journal of Cleaner Production, 2018, 176: 1213–1222.

[8] Gao G, Shen Q, Zhang Y, et al. Determining spatio-temporal variations of ecological water consumption by natural oases for sustainable water resources allocation in a hyper-arid endorheic basin[J]. Journal of Cleaner Production, 2018, 185: 1–13.

[9] 亢丹, 田美荣, 高吉喜, 等. 基于SEBAL模型的赤峰市植被修复下林草蒸散耗水特征[J/OL]. 环境科学研究. https: //10. 13198/j. issn. 1001-6929. 2020-03-36. [Kang Dan, Tian Meirong, Gao Jixi, et al. Characteristics of actual evapotranspiration and water consumption of forest and grassland ecosystems under vegetation restoration projects based on the SEBAL model in Chifeng, China [J/OL]. Research of Environmental Sciences. https: //10. 13198/j. issn. 1001-6929. 2020-03-36.]

[10] Chi D, Wang H, Li X, et al. Estimation of the ecological water requirement for natural vegetation in the Ergune river basin in northeastern China from 2001 to 2014[J]. Ecological Indicators, 2018, 92: 141–150.

[11] 郭巧玲, 冯起, 杨云松, 等. 黑河大墩门至狼心山段生态需水量估算[J]. 干旱区研究, 2007, 24(5): 584–589. [Guo Qiaoling, Feng Qi, Yang Yunsong, et al. Estimation of ecological water consumption in the region from Dadunmen to Langxin Mountain in the Heihe river basin[J]. Arid Zone Research, 2007, 24(5): 584–589.]

[12] 王菊翠, 丁华, 胡安焱. 陕西关中地区生态需水量的初步估算[J]. 干旱区研究, 2008, 25(1): 22–27. [Wang Jucui, Ding Hua, Hu Anyan. Preliminary estimation of water consumption for the ecology in the Guanzhong region, Shaanxi province, China[J]. Arid Zone Research, 2008, 25(1): 22–27.]

[13] 刘新华, 徐海量, 凌红波, 等. 塔里木河下游生态需水估算[J]. 中国沙漠, 2013, 33(4): 1198–1205. [Liu Xinhua, Xu Hailiang, Ling Hongbo, et al. Study on ecological water requirements along the mainstream channel of the Tarim river [J]. Journal of Desert Research, 2013, 33(4): 1198–1205.]

[14] 彭飞, 何新林, 刘兵, 等. 干旱区荒漠植被生态需水量计算方法研究[J]. 节水灌溉, 2017(12): 90–93. [Peng Fei, He Xinlin, Liu Bing, et al. A study on estimation method for ecological water requirement of desert vegetation in arid area[J]. Water Saving Irrigation, 2017(12): 90–93.]

[15] 李强坤, 李怀恩, 张会敏, 等. 基于生态需水配置的额济纳绿洲恢复方案[J]. 干旱区研究, 2008, 25(4): 457–463. [Li Qiangkun, Li Huai'en, Zhang Huimin, et al. Study on the schemes for restoring the Erjina oasis based on the redistribution of ecological water

consumption[J]. Arid Zone Research, 2008, 25(4): 457-463.]

[16] 满苏尔·沙比提, 玉素浦江·买买提, 胡江玲. 新疆渭干河—库车河三角洲绿洲生态需水研究[J]. 干旱区研究, 2008, 25(3): 325-330. [Mansur Shabiti, Yusup Maimaiti, Hu Jiangling. Study on ecological water consumption in the Ogan-Kuqa river delta oasis in Xinjiang [J]. Arid Region Research, 2008, 25(3): 325-330.]

[17] Zhang L. Ecological water requirement based on ecological protection and restoration targets in the lower reaches of the Heihe river, northern China[J]. Frontiers of Forestry in China, 2009, 4(3): 263-270.

[18] 叶红梅, 陈少辉, 盛丰. 疏勒河灌区2000-2014年植被生态适宜需水动态研究[J]. 冰川冻土, 2016, 38(1): 231-240. [Ye Hongmei, Chen Shaohui, Sheng Feng. Dynamic estimation for vegetation ecological water demand in Shule River irrigation district during 2000-2014[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2016, 38(1): 231-240.]

[19] 孙栋元, 胡想全, 金彦兆, 等. 疏勒河中游绿洲天然植被生态需水量估算与预测研究[J]. 干旱区地理, 2016, 39(1): 154-161. [Sun Dongyuan, Hu Xiangquan, Jin Yanzhao, et al. Prediction and evaluation of ecological water requirement of natural vegetation in the middle reaches oasis of Shulehe river basin[J]. Arid Land Geography, 2016, 39(1): 154-161.]

[20] 岳东霞, 陈冠光, 朱敏翔, 等. 近20年疏勒河流域生态承载力和生态需水研究[J]. 生态学报, 2019, 39(14): 5178-5187. [Yue Dongxia, Chen Guanguang, Zhu Minxiang, et al. Biocapacity and ecological water demand in Shule River basin over the past 20 Years[J]. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(14): 5178-5187.]

[21] 曾建军. 景观格局变化背景下疏勒河流域生态承载力和生态需水研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2018. [Zeng Jianjun. Change of Ecological Carrying Capacity and Ecological Water Demand along with Landscape Pattern Evolution in Shule River Basin[D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2018.]

[22] 白元, 徐海量, 张青青, 等. 基于地下水恢复的塔里木河下游生态需水量估算[J]. 生态学报, 2015, 35(3): 630-640. [Bai Yuan, Xu Hailiang, Zhang Qingqing, et al. Evaluation on ecological water requirement in the lower reaches of Tarim river based on groundwater[J]. Acta Ecologica Sinica, 2015, 35(3): 630-640.]

[23] 范亚云, 郭玉川, 卢刚, 等. 艾比湖流域植被生态需水量[J]. 中国沙漠, 2018, 38(4): 865-871. [Fan Yayun, Guo Yuchuan, Lu Gang, et al. Vegetation ecological water requirement of Ebinur lake watershed[J]. Journal of Desert Research, 2018, 38(4): 865-871.]

[24] 赵文智, 常学礼, 何志斌, 等. 额济纳荒漠绿洲植被生态需水量研究[J]. 中国科学: 地球科学, 2006, 36(6): 559-566. [Zhao Wenzhi, Chang Xueli, He Zhibin, et al. Study on ecological water requirement of vegetation in Erjina desert oasis[J]. Scientia Sinica (Terrae), 2006, 36(6): 559-566.]

[25] 王改玲, 王青杵, 石生新. 山西省永定河流域林草植被生态需水研究[J]. 自然资源学报, 2013, 28(10): 95-105. [Wang Gailing, Wang Qingchu, Shi Shengxin. Vegetation' s ecological water requirement in Yongding river watershed in Shanxi province[J]. Journal of Natural Resources, 2013, 28(10): 95-105.]

[26] 刘娇. 基于3S技术的黑河流域植被生态需水量研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2014. [Liu Jiao. Study on Vegetation Ecological Water Requirement in the Heihe River Basin Based on 3S Technology[D]. Yangling: Northwest A & F University, 2014.]

[27] Wang L, Zhang J, Liu Z, et al. Ecological water requirement of plant-soil systems along the Silk Road Economic Belt: A case study of the Guanzhong- Tianshui region, China[J]. Geological Journal, 2018, 53(Suppl.): 293-300.

[28] 谢蕾, 龙爱华, 邓铭江, 等. 伊犁河下游三角洲生态耗水研究[J]. 冰川冻土, 2011, 33(6): 1330-1340. [Xie Lei, Long Aihua, Deng Mingjiang, et al. Study on ecological water consumption in delta of the lower reaches of Ili river[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2011, 33(6): 1330-1340.]

[29] 齐敬辉. 疏勒河流域绿洲生态演变研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2017. [Qi Jinghui. The Research on Oasis Ecological Evolution of Shule River Basin[D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2017.]

[30] 周妍妍, 郭晓娟, 郭建军, 等. 基于SEBAL模型的疏勒河流域蒸散量时空动态[J]. 水土保持研究, 2019, 26(1): 174-183. [Zhou Yanyan, Guo Xiaojuan, Guo Jianjun, et al. Spatiotemporal dynamics of evapotranspiration in Shule River basin based on SEBAL model[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2019, 26(1): 174-183.]

[31] 高前兆. 河西内陆河流域的水循环特征[J]. 干旱气象, 2003, 21(3): 23-30. [Gao Qianzhao. The features of water cycle in inland river basins in Hexi region[J]. Journal of Arid Meteorology, 2003, 21(3): 23-30.]

[32] 李曼, 丁永建, 杨建平, 等. 疏勒河径流量与绿洲面积、农业产值及生态效益的关系[J]. 中国沙漠, 2015, 35(2): 514-520. [Li Man, Ding Yongjian, Yang Jianping, et al. The impact of runoff on the oasis area, agro-output value and ecological benefits in the Shulehe River[J]. Journal of Desert Research, 2015, 35(2): 514-520.]

[33] Allen R G, Pereira L S, Raes D, et al. Crop evapotranspiration guidelines for computing crop requirements. FAO Irrig. Drain. Report modeling and application[J]. Journal of Hydrology, 1998, 285: 19-40.

[34] 刘惠峰. 基于时序NDVI的疏勒河流域植被覆盖分类研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2014. [Liu Huifeng. Vegetation Classification of the Basin of Shule River Based on NDVI Time Series[D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2014.]

[35] 冯湘华. 西部典型牧区草地生态系统植被生态需水研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2019. [Feng Xianghua. Study on Vegetation Ecological Water Requirement of Grassland Ecosystem in Typical Pastoral Areas of Western China [D]. Xi' an: Xi' an University of Technology, 2019.]

[36] 中国科学院地理研究所. 中国动植物物候观测年报: 第8号(1981—1982年)[M]. 北京: 科学出版社, 1988. [Institute of Geography, Chinese Academy of Sciences. Annual Report on Phenological Observations of Chinese Flora and Fauna: NO. 8 (1981-1982)[M]. Beijing: Science Press, 1988.]

[37] Lin P, He Z, Du J, et al. Impacts of climate change on reference evapotranspiration in the Qilian mountains of China: Historical trends and projected changes[J]. International Journal of Climatology, 2018, 38(7): 1-14.

[38] 邓兴耀, 刘洋, 刘志辉, 等. 中国西北干旱区蒸散发时空动态特征[J]. 生态学报, 2017, 37(9): 2994-3008. [Deng Xingyao, Liu Yang, Liu Zhihui, et al. Temporal-spatial dynamic change charac-

teristics of evapotranspiration in arid region of Northwest China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2017, 37(9): 2994–3008.]

[39] 张瑞文, 赵成义, 王丹丹, 等. 极端干旱区不同水分条件下胡杨林生态耗水特征[J]. 水土保持学报, 2019, 33 (4): 270–278. [Zhang Ruiwen, Zhao Chengyi, Wang Dandan, et al. Ecological water consumption characteristics of *Populus euphratica* forest under different water conditions in extremely arid area[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2019, 33(4): 270–278.]

[40] 郭建军, 李凯, 江宝骅, 等. 流域生态承载力空间尺度效应分析——以石羊河流域为例[J]. 兰州大学学报(自然科学版), 2014, 50(3): 383–389. [Guo Jianjun, Li Kai, Jiang Baohua, et al. Effects of the spatial scale on regional biocapacity: A case study of Shiyang river basin[J]. Journal of Lanzhou University (Natural Sciences), 2014, 50(3): 383–389.]

[41] 姜田亮, 马文珍, 陶李. 基于水资源承载力的渭河源规模化林场植被设计面积计算[J]. 水电能源科学, 2019, 37(9): 24–27. [Jiang Tianliang, Ma Wenzhen, Tao Li. Vegetation design area calculation of Weihe source large-scale forest farm based on water resources[J]. Water Resources and Power, 2019, 37(9): 24–27.]

[42] 甘肃省人民政府办公厅. 甘肃省人民政府办公厅关于印发甘肃省土地利用总体规划(2006—2020 年)调整完善方案的通知[EB/OL]. http: //www. gansu. gov. cn/art/2017/11/1/art_4786_325467. html. 2017–11–02. [General Office of the People's Government of Gansu Grovince. General Office of the People's Government of Gansu Province on the Issuance of the General Plan for Land Use of Gansu Province (2006–2020) Adjustment and Improvement of the Program Notice[EB/OL]. http: //www. gansu. gov. cn/art/2017/11/1/art_4786_325467. html. 2017–11–02.]

[43] Liu Y, Song W, Deng X. Spatiotemporal patterns of crop irrigation water requirements in the Heihe river basin, China[J]. Water, 2017, 9(8): 616–637.

[44] 巢清尘, 严中伟, 孙颖, 等. 中国气候变化的科学新认知[J]. 中国人口·资源与环境, 2020, 30(3): 1–9. [Chao Qingchen, Yan Zhongwei, Sun Ying, et al. A recent scientific understanding of climate change in China[J]. China Population, Resources and Environment, 2020, 30(3): 1–9.]

Spatial and temporal distribution of vegetation water consumption in Shule River Basin based on improved penman formula method

WEI Le-min[1], ZHENG Xu[1], GUO Jian-jun[2], ZHOU Yan-yan[1], YUE Dong-xia[1]

(1. *College of Earth and Environmental Sciences*, *Lanzhou University*, *Lanzhou* 730000, *Gansu*, *China*;
2. *Key Laboratory of Desert and Desertification*, *Northwest Institute of Eco-Environmental and Resources*, *Chinese Academy of Sciences*, *Lanzhou* 730000, *Gansu*, *China*)

Abstract: Shule River Basin is located in the inland arid region and water resource is the key factor restricting the growth and development of vegetation in the basin. The study of the vegetation water consumption plays a crucial role in enabling the rational allocation of water resource in the basin. Based on meteorological data and GIS technology, this study quantitatively analyzed the spatial and temporal variation characteristics of vegetation water consumption of Shule River Basin and different vegetation types at each growth stage using the improved penman formula method. Results show that vegetation water consumption in Shule River Basin increased from 2000 to 2015 and that the average annual water consumption was 18.24×10^8 m^3. There is obvious spatial heterogeneity in the vegetation water consumption. Vegetation water consumption in the southern Qilian Mountains is the most and least in the northern Mazong Mountains. Desert vegetation consumes the highest amount of water (11.25×10^8 m^3), while forest land consumes the least water (0.10×10^8 m^3). From 2000 to 2015, water consumption at different growth stages of vegetation varied significantly. Water consumptions at early growth stage and development stage decreased, while water consumptions at the middle growth stage and later growth stage increased. Compared with the change of vegetation distribution, change of reference evapotranspiration is the main factor affecting the change of vegetation water consumption in Shule River Basin.

Key words: Shule River Basin; vegetation water consumption; evapotranspiration; improved penman formula method